

粘弾性流体のらせ管流れにおける管摩擦損失

蝶野 成臣* 家元 良幸*

Friction Loss for Viscoelastic Flow in Helical Pipes

Shigeomi CHONO and Yoshiyuki IEMOTO

(Received Feb. 29, 1992)

Friction factors have been measured for viscoelastic flows in straight and helical pipes with circular cross-section for relatively low Dean numbers. The friction factors for helical flows decrease linearly with increasing the Reynolds numbers in log-log scale. The ratio of radius of pipe axis curvature to pipe radius has few effects on the friction factor within the present experiment. The ratio of the friction factor for helical flows to that for straight flows takes almost a constant for the Dean number less than 10. Contrary to this, the friction factor ratio increases monotonously with the increment of the Dean number when the Dean number is larger than 10. In some cases the friction factor ratio takes the value less than unity, which is considered to be due to the effect of fluid elasticity.

1. 緒 言

高分子溶液や融液の流れは、合成繊維の紡糸や合成樹脂の成形加工技術に関連して重要である。これらの流体は、一般に粘性力のみならず弾性力も有する粘弾性流体であり、そのうえ粘性として非ニュートン粘性を示すため、ニュートン流体には見られない特異な現象を呈する。従来からいろいろな流れ場について研究が行われているが、曲管内の流れに関する研究は比較的少ない。一般に曲管においては、遠心力によって生じる二次流れのため、管摩擦抵抗は直管の管摩擦抵抗に比較して大きい。BarnesとWalters⁽¹⁾は、曲率半径比（管軸の曲率半径と管半径の比）が50～1250の円弧状円管内を、希薄高分子溶液が流れる場合の圧力降下と流量を測定し、ニュートン流体と比較して、同じ圧力降下のもとでは流量が増加することを明らかにしている。MashelkarとDevarajan⁽²⁾は、曲率半径比が7.4～100、ディーン数が70～400の範囲で、らせ管内に純粘性流体と粘弾性流体を流し管摩擦損失を測定している。最近では、高見ら^{(3)～(5)}が曲り管内の流れを理論と実験から詳細に調べ

*材料化学科

ているが、弾性については触れておらず、純粘性流体として解析している。

本研究では、ら旋管内に粘弾性流体が流れる場合の管摩擦損失を測定し、直管での損失と比較検討する。MashelkarとDevarajanの実験が高ディーン数の範囲で行われていることから、本実験は低ディーン数領域での測定を目的とする。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。タンク①内の試料溶液は、ポンプ②により測定区間へ送られ、再びタンクへ戻る。測定区間は、直管部③およびら旋管部④から成っている。直管およびら旋管には、内径25mm、外形28mmの透明なビニル管を用いた。ら旋管形状は、ビニル管を外径216mmの円筒体⑤に巻き付けて製作した。ら旋管の中心間距離は244mmである。ビニル管の断面を円形に保つため、ビニル管の外径と同じ大きさの内径を持つ座金を、約100mm間隔でビニル管に取り付けた。直管、ら旋管には、図のようにそれぞれ2箇所、計4箇所測圧孔⑥が設けられている。測圧孔の間隔は、直管部では500mm、ら旋管部では1ピッチ P に相当する長さとした。直管部、ら旋管部の前半は、それぞれ長さ500mmおよびら旋一巻きの長さの助走区間とした。圧力測定には液柱マンメータを用いた。粘弾性流体の場合、この測定方法ではホールエラーが問題となる。しかしながら両測圧孔での流れ模様は同一であると見なすことができ、さらに測定値が両測圧孔間の相対圧であることを考慮すれば、ホールエラーによる誤差は極めて小さいといえる。

試料溶液には、粘弾性流体であるPolyacrylamide(PAA) Separan AP-30 水溶液を用いた。図2に、本実験で使用した6種類の濃度 C の見かけの粘度 η とせん断速度 $\dot{\gamma}$ の関係を示す。いずれの濃度の場合にも、 $\dot{\gamma}$ に対し η は両対数尺度上で直線的な変化を示していることから、本研究ではPAA水溶液の粘性力について指数法則が成り立つと仮定し、 η を次式で表す。

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

ただし n は構造粘度指数、 K は擬塑性粘度である。各濃度における n と K の値を表1に示す。

実験は、図2に示した6種類のPAA水溶液、ら旋管のピッチ $P=60, 220, 450\text{mm}$ の3種類について、流量を種々に変化させて行った。流量の調節は、ポンプに取り付けられている無段変速機により、ポンプの回転数を変化させることによって行うことができる。ピッチ $P=60, 220, 450\text{mm}$ は、曲率半径比 R がそれぞれ10.0, 10.4, 11.5に相当する。

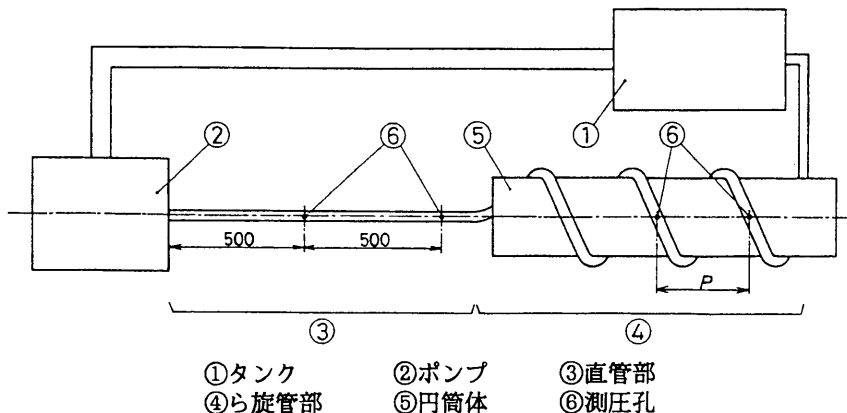


図1 実験装置の概略

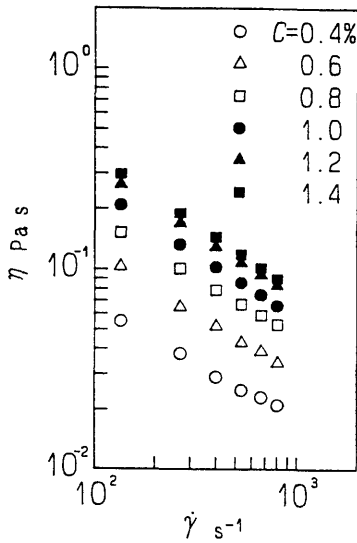


図2 見かけの粘度とせん断速度の関係

表1 試料溶液の n と K

$C \%$	n	$K \text{ Pas}^n$
0.4	0.473	0.66
0.6	0.423	1.60
0.8	0.400	2.65
1.0	0.365	4.27
1.2	0.346	6.04
1.4	0.324	7.62

3. 結果および考察

ダルシー・ワイスバッハの式より、管摩擦係数 λ は

$$\frac{\Delta p}{\Delta s} = \lambda \frac{1}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (2)$$

で定義される。ただし、 Δp は管軸方向距離 Δs 間における圧力損失、 d は管内径、 u は管内の平均流速、 ρ は流体密度で、本実験では $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ とした。

図3(a)~(c)に、溶液濃度 $C=0.6, 1.0, 1.4\%$ における、直管の管摩擦係数 λ_s を示す。横軸の Re は、指数法則流体の場合のレイノルズ数

$$Re = \rho u^{2-n} d^n / K \quad (3)$$

である。図中の直線は、純粘性指数法則流体の円

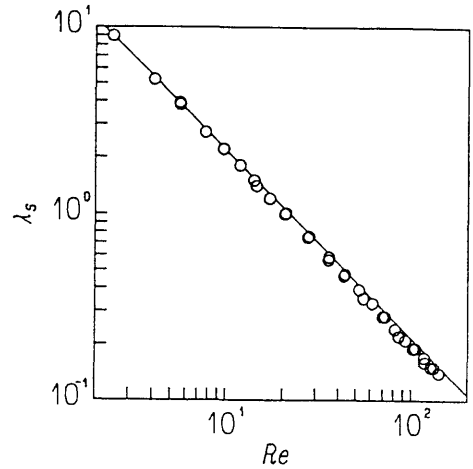
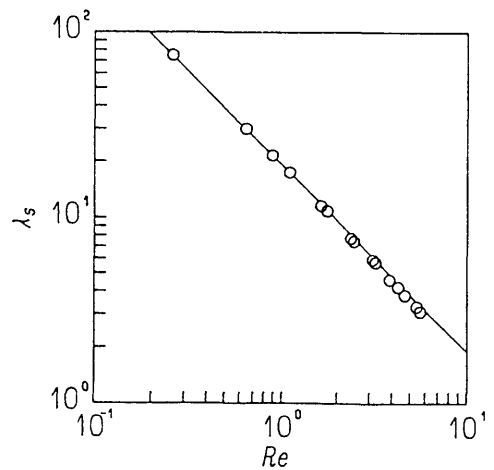
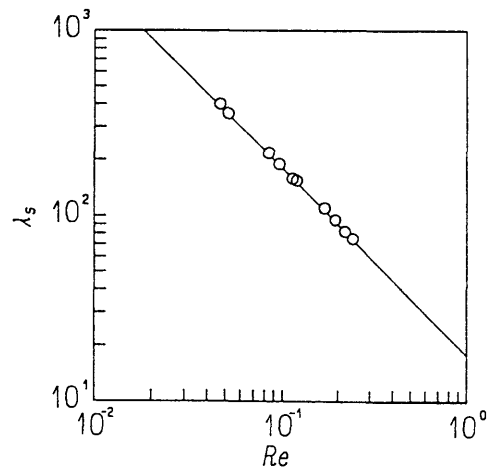
(a) $C=0.6\%$ (b) $C=1.0\%$ (c) $C=1.4\%$

図3 直管の管摩擦係数とレイノルズ数の関係

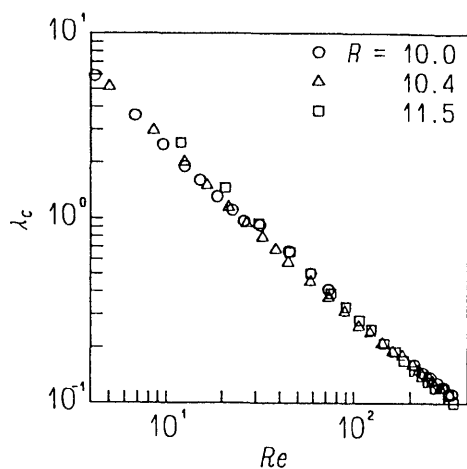
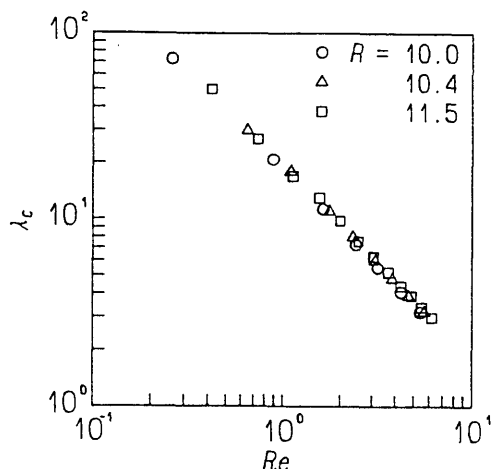
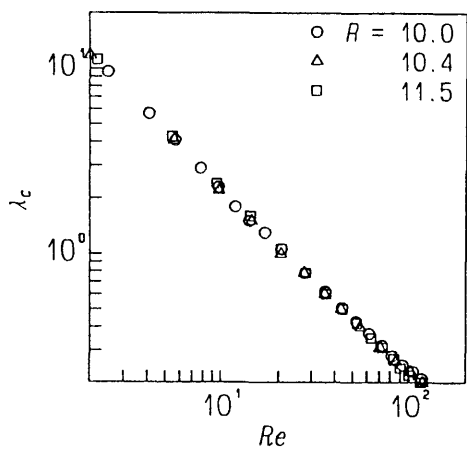
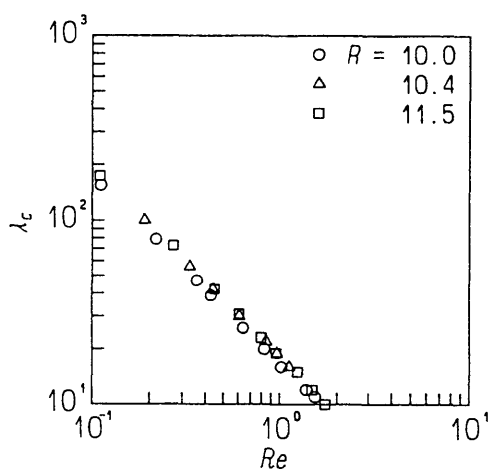
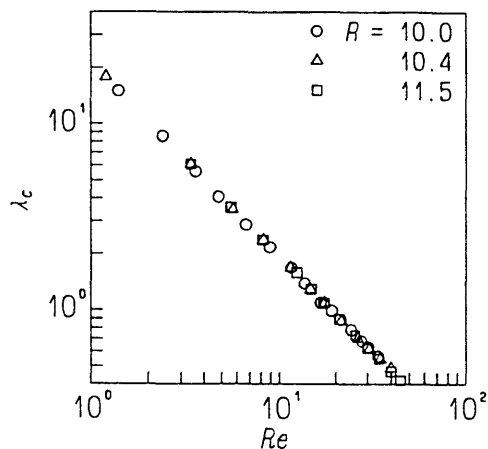
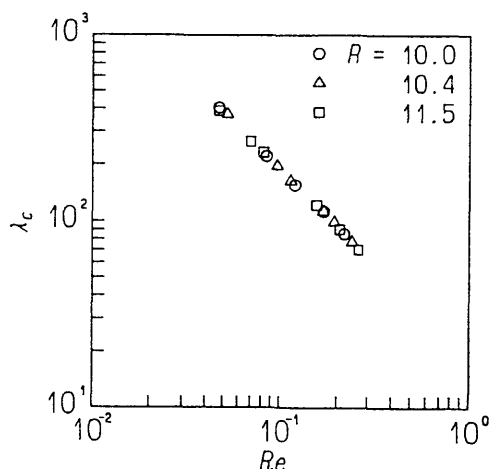
(a) $C=0.4\%$ (d) $C=1.0\%$ (b) $C=0.6\%$ (e) $C=1.2\%$ (c) $C=0.8\%$ (f) $C=1.4\%$

図4 ら旋管の管摩擦係数とレイノルズ数の関係

管内定常流れにおける管摩擦係数の理論式⁽⁶⁾

$$\lambda_s = 8\{2(3n+1)/n\}^n / Re \quad (4)$$

を示している。図より両対数尺度で表した場合、 λ_s は Re に対して直線的に減少している。実験値は理論式(4)と満足に一致しており、直管内流れでは、試料溶液の弾性力は管摩擦係数にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。事実、粘性力と弾性力がともに指数法則に従うWhite-Metznerモデルの円管内定常流れでは、速度分布や流量と圧力損失の関係などは、純粘性指数法則流体の場合と同じになり、弾性の影響は現れない⁽⁶⁾。

曲管の管摩擦係数 λ_c を、濃度別に図4(a)～(f)に示す。いずれの濃度においても、両対数尺度上では、 λ_c は Re に対してほぼ直線的に減少している。ただし濃度の低い $C=0.4, 0.6\%$ で Re が約100よりも大きい範囲では、 λ_c がこの直線よりもわずかながら上回る傾向が見られる。曲率半径比 R の影響はほとんど現れていない。一般に、管摩擦係数をレイノルズ数に対してプロットした場合、曲率半径比毎に曲線が並ぶが、本実験では R の範囲がかなり狭いため、この影響を示すには至らなかった。

レイノルズ数が極めて小さいニュートン流体の流れでは、曲管における管摩擦損失は直管の場合よりも小さく、同一の圧力勾配に対して曲管の方が流れ易い。一方粘弾性流体については、家元と澤寄⁽⁷⁾は円環状円管内のWhite-Metzner流体の流れを摂動解析し、弾性力の増加とともに曲管での管路抵抗が、直管に比して減少することを明らかにした。そこで本研究においても同様の比較をすることにより、らせん管での流動性について検討する。管摩擦係数比 λ_c/λ_s を、ディーン数

$$De = Re\sqrt{R} \quad (5)$$

に対してプロットしたのが図5である。上述したように本実験範囲では R の影響を示すには至っていないので、 $R=10.0$ の結果のみを代表として示す。 De が10よりも小さい範囲では、 λ_c/λ_s は0.95～1.1の間でほぼ一定値を取るが、 De が10以上の領域では、 λ_c/λ_s は De の増加とともに単調に増

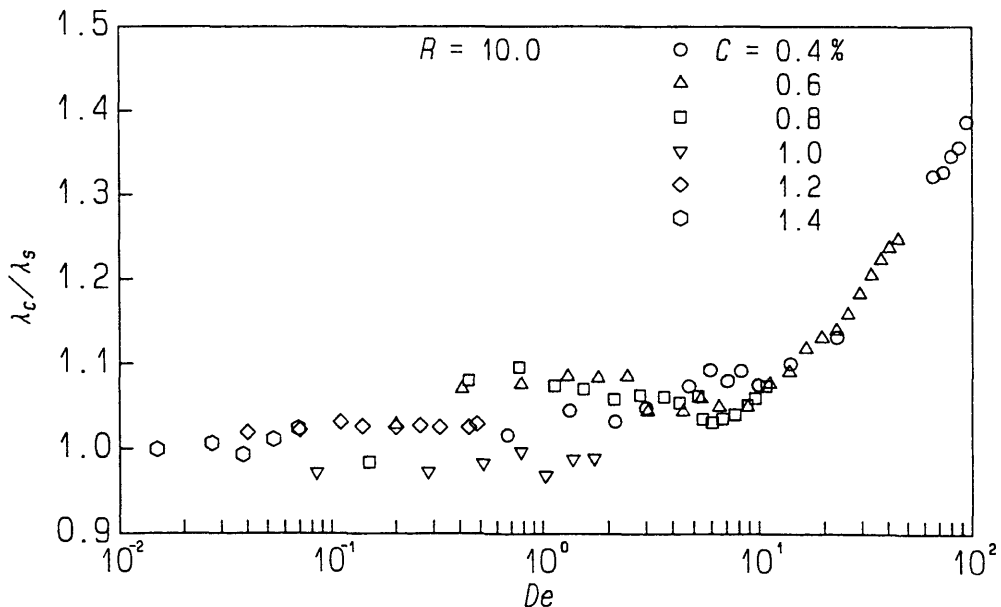


図5 管摩擦係数比とディーン数の関係

加している。純粘性指数法則流体の場合、管摩擦係数比はディーン数に対して、曲率半径比や構造粘度指数に無関係に一本の曲線で表される。本研究でもほぼ同様の傾向が示されているが、 De の小さい範囲で若干濃度による差が見られる。これは、本実験で使用した流体の弾性効果によるものであると考えられる。とくに $C=1.0\%$ の全データと $C=1.4\%$ の一部で、 λ_c/λ_s が 1 以下の値を取っており、同じ圧力勾配のもとで曲管の方が直管に比して流動し易いことが確認できる。 $C=1.2\%$ の場合には λ_c/λ_s は 1 以上であり、必ずしも溶液の濃度順になっていない。これは、濃度とともに弾性力は増加するが粘性力も増加し、両者の割合が必ずしも濃度とともに単調に増加していないためと予想される。今後、弾性力（第一法線応力差等）の測定を行い、レイノルズ数、ワイセンベルグ数および曲率半径比⁽⁷⁾で測定結果を整理する必要がある。

4. 結 言

本研究では、円形断面の直管およびらせん管内を流れる粘弾性流体の管摩擦係数を、ディーン数が比較的小さい場合について測定した。得られた結果を要約して以下に示す。

- (1) 直管内流れにおいて管摩擦係数の実験値は、純粘性流体を仮定した理論値と十分に一致した。従って、弾性力の効果はほとんど現れない。
- (2) らせん管内流れにおける管摩擦係数は、レイノルズ数の増加に対して対数尺度でほぼ直線的に減少する。
- (3) 本実験範囲では、曲率半径比の影響を示すには至らなかった。
- (4) 直管に対する曲管の管摩擦係数の比は、ディーン数が 10 以下ではほぼ一定であるが、10 を越えるとディーン数の増加とともに単調に増加する。
- (5) 溶液濃度が 1.0, 1.4% の場合、管摩擦係数比は 1 以下の値を取り、同一の圧力勾配に対して曲管の方が直管よりも流れ易いことが明らかとなった。これは、流体の弾性力によるものと考えられる。

終わりに、本研究を遂行するに当たり、福井大学工学部学生であった三浦明石氏、吉川雅文氏には多大の援助を賜った。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Barnes, H.A. and Walters, K., Proc. Roy. Soc. London, A314 (1969), 85.
- (2) Mashelkar, R.A. and Devarajan, G.V., Trans. Inst. Chem. Eng., 54 (1976), 108.
- (3) 高見・須藤・富田, 機論, 52, B (昭61), 1228.
- (4) 高見・須藤・富田, 機論, 52, B (昭61), 1235.
- (5) 高見・須藤・富田, 機論, 53, B (昭62), 850.
- (6) 富田, レオロジー, コロナ社, 268.
- (7) 家元・澤岩, 織機誌, 34 (1981), T1.